

基于响应面和人工神经网络-遗传算法优化 液态发酵制备藕渣可溶性膳食纤维

李玲玉^{1,2}, 刘小莉^{1,2*}, 张宏志^{1,2}

(1. 南京农业大学 食品科技学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所,
江苏 南京 210014)

摘要: 为实现莲藕副产物的高值化应用以及藕渣可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量的提高, 该文以藕渣为原料, 接种副干酪乳杆菌 PC18 发酵改性制备藕渣可溶性膳食纤维, 通过单因素试验及 Box-Behnken 试验设计, 探讨料液比、发酵时间、接种量对藕渣可溶性膳食纤维含量的影响, 在此基础上, 选用响应面(response surface methodology, RSM)和人工神经网络-遗传算法(artificial neural networks and genetic algorithms, ANN-GA)构建发酵模型, 并对两者优化结果及模型参数进行比较。单因素及 Box-Behnken 试验结果表明, 影响藕渣 SDF 含量主要因素主次顺序依次为发酵时间、料液比、接种量。通过验证试验及模型参数与优化结果对比分析, 发现 RSM 与 ANN-GA 构建的模型整体拟合效果均较好, 但 ANN-GA 模型预测值、试验值更高, 相对误差值更低。基于 ANN-GA 确定最佳工艺参数为料液比 1:38 (g/mL)、发酵时间 48 h、接种量 4.0%, 经验证得到此条件下 SDF 含量为(5.97±0.73)%。

关键词: 藕渣; 膳食纤维; 液态发酵; 人工神经网络; 遗传算法

Optimization of Soluble Dietary Fiber from Liquid Fermented Lotus Root Residues Based on Response Surface and Artificial Neural Networks-Genetic Algorithms

LI Lingyu^{1,2}, LIU Xiaoli^{1,2*}, ZHANG Hongzhi^{1,2}

(1. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 2. Institute of Agricultural Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: To realize the high-value application of lotus root by-products and improve the soluble dietary fiber (SDF) content of lotus root residues, this paper used lotus root residues as raw materials and inoculated *Lactobacillus paracasei* PC18 to prepare SDF from lotus root residues through fermentation and modification. The effects of material-liquid ratio, fermentation time, and inoculation amount on the SDF content of lotus root residues were investigated through single-factor experiments and Box-Behnken experiments. On this basis, the fermentation model was constructed by using response surface methodology (RSM), as well as artificial neural networks and genetic algorithms (ANN-GA), and the optimization results and model parameters of the two methods were compared. The results of the single-factor and Box-Behnken experiments showed that the main factors affecting the SDF content of lotus root residues, in descending order of significance, were fermentation time, material-liquid ratio, and inoculum amount. Through the validation experiments and the comparative analysis of model parameters and optimization results, it was found that the overall fitting effect of models constructed by RSM and ANN-GA were both good, but the ANN-GA model had higher predictive and experimental values and lower relative error values. Based on ANN-GA, the optimal process parameters were determined as a material-liquid ratio of 1:38 (g/mL), a fermentation time of 48 h, and an inoculum amount of 4.0%, and the SDF content was verified to be (5.97±0.73)% under these conditions.

Key words: lotus root residue; dietary fiber; liquid fermentation; artificial neural networks; genetic algorithms

基金项目: 江苏省科技项目(BE2022367)

作者简介: 李玲玉(1999—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品微生物。

*通信作者: 刘小莉(1981—), 女, 研究员, 博士, 研究方向: 食品微生物。

引文格式:

李玲玉,刘小莉,张宏志.基于响应面和人工神经网络-遗传算法优化液态发酵制备藕渣可溶性膳食纤维[J].食品研究与开发,2024,45(23):100-107.

LI Lingyu, LIU Xiaoli, ZHANG Hongzhi. Optimization of Soluble Dietary Fiber from Liquid Fermented Lotus Root Residues Based on Response Surface and Artificial Neural Networks-Genetic Algorithms[J]. Food Research and Development, 2024,45(23):100-107.

莲藕是我国生产面积最大、产量最高的水生蔬菜^[1],富含膳食纤维、多糖、维生素、矿物质等^[2],具有降血脂、降血糖、降低胆固醇等生物学功能^[3]。莲藕渣是莲藕加工过程中的主要副产物,主要包括藕节、莲藕皮、榨汁后的藕渣,约占莲藕鲜重的30%^[4]。由于现有工艺限制或生产链不完善等原因,导致其营养价值和资源效益未得到充分利用,特别是作为食品中膳食纤维的潜在来源^[5],如何开发高附加值产品具有重要的研究意义。

膳食纤维被称为第七大营养素,是指难以被人体酶消化的植物成分总称^[6-7]。根据溶解性可分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)与不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)^[8]。研究表明,膳食纤维的很多重要生理功能都与SDF有很大的关系,与IDF相比,SDF具有更优良的吸附能力、抗氧化活性以及改善肠道菌群等^[9]。但一般膳食纤维中SDF含量都很低,只有3%~6%,无法达到膳食平衡要求^[10]。因此众多学者采用物理法、化学法、酶法、微生物发酵法等^[11]不同方法对膳食纤维进行改性,以达到提高SDF含量并发挥其生理功能的目的。其中,微生物发酵法优势比较突出,是一种绿色环保、安全性好、相对高效且低成本的手段^[12]。

针对微生物发酵工艺优化主要采用正交试验、响应面法等,但发酵过程中各营养成分之间具有复杂非线性,传统方法在处理非线性问题时具有一定的局限性^[13]。而人工神经网络是由线性或非线性传递函数高度互连的处理神经元组成^[14],能够实现加权和偏置的多元线性回归^[15],并结合遗传算法通过自然选择和遗传机制寻找最佳解决方案^[16]。因此作为优于响应面(response surface methodology, RSM)的互补模型,人工神经网络-遗传算法(artificial neural networks and genetic algorithms, ANN-GA)耦合优化发酵条件的研究越来越受到学者关注。但目前国内关于RSM和ANN-GA优化方法比较的研究较少。因此,本研究以藕渣为原料,副干酪乳杆菌PC18为试验菌株,通过响应面试验、人工神经网络-遗传算法优化乳酸菌发酵改性的最佳工艺参数,并对两种优化方法进行比较,以期获得更高产量的可溶性膳食纤维。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

MRS液体培养基:北京澳博星生物技术有限公司;莲藕、白砂糖:市售;副干酪乳杆菌(*Lactobacillus paracasei*)PC18菌株:江苏省农业科学院农产品加工所食品生物工程实验室;氢氧化钠(分析纯):西陇科学股份有限公司;乙醇、乙酸(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;2-(N-吗啡啉)乙磺酸-三羟甲基氨基甲烷[2-morpholinoethanesulphonic acid-tris(hydroxymethyl)aminomethane, MES-TRIS]、淀粉葡萄糖苷酶(10^5 U/mL)(均为生化试剂):上海麦克林生化科技有限公司;三羟甲基氨基甲烷(生化试剂):美国Genview公司;热稳定 α -淀粉酶溶液[($10^5 \pm 10^3$) U/mL,生化试剂]:上海蓝季科技发展有限公司;碱性蛋白酶(200 U/mg,生化试剂):上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

JJ500型电子天平:常州市双节测试仪器厂;DSX-18L-I手提式高压蒸汽灭菌器:上海申安医疗器械厂;LRH-150生化培养箱:上海恒科学仪器有限公司;HH-4S数显恒温油浴锅:杭州保恒恒温技术有限公司;LXJ-IIB低速离心机:上海安亭科学仪器厂;DHG-9076A电热恒温鼓风干燥箱:上海精宏实验设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 藕渣粉末制备及发酵

将新鲜藕渣置于65℃电热恒温鼓风干燥箱烘干至恒重,烘干后藕渣粉碎处理,过100目筛,过筛后藕渣粉末装密封袋保存,备用。

甘油保种管中取菌种于MRS液体培养基中37℃培养24h活化2次,以3%接种量扩培至50 mL MRS液体培养基中37℃培养24h。菌液于5 000 r/min离心10 min,弃去上清液,用0.85%生理盐水清洗2~3次,收集菌体,加与培养液同体积的无菌生理盐水,调整菌浓度为7.0 lg(CFU/mL),制成菌悬液。称取莲藕渣粉,以一定的比例加入蒸馏水,按照2%比例添加白砂糖,混匀溶解,高速匀浆30 s或1 min后,分装到250 mL三角瓶中,在108℃条件下进行15 min灭菌处理,灭菌后样品在无菌操作台中按2%接种量接种副干酪乳杆菌PC18菌株,在一定条件下对藕渣粉末中

可溶性膳食纤维发酵改性。

1.3.2 可溶性膳食纤维提取

按照 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》并稍作修改。称取发酵样液 50 g 于 250 mL 锥形瓶,加入 0.05 mol/L MES-TRIS 缓冲液 80 mL,混匀。加入 0.10 mL 热稳定 α -淀粉酶溶液,在 95 °C 恒温水浴反应 35 min;溶液冷却至 60 °C 后,加入 0.20 mL 碱性蛋白酶液(200 U/mg),在 60 °C 恒温水浴反应 30 min 后,加入 3 mol/L 乙酸溶液,调节溶液 pH 值至 4.5±0.2;再加入 0.20 mL 淀粉葡萄糖苷酶液(10^5 U/mL),在 60 °C 恒温水浴反应 30 min。将莲藕渣酶解溶液过滤,得到滤液。取出残渣,电热恒温鼓风干燥箱烘干至恒重,得到莲藕渣 IDF。滤液与 95% 乙醇(体积比 1:4)混配制后进行醇沉过夜,5 000 r/min 离心 15 min,取沉淀在 65 °C 电热恒温鼓风干燥箱中烘干至恒重,得到藕渣 SDF。SDF 含量($S, \%$)和 IDF 含量($I, \%$)计算公式如下。

$$S = \frac{m_1}{m} \times 100$$

式中: m 为发酵培养基中原干藕渣质量,g; m_1 为发酵样品提取到 SDF 质量,g。

$$I = \frac{m_2}{m} \times 100$$

式中: m 为发酵培养基中原干藕渣质量,g; m_2 为发酵样品提取到 IDF 质量,g。

1.3.3 副干酪乳杆菌 PC18 发酵藕渣工艺优化

1.3.3.1 单因素试验

在灭菌温度 108 °C、灭菌时间 15 min、白砂糖添加量 2% 基础上进行单因素试验,分别探究料液比[1:10、1:20、1:30、1:40、1:50 (g/mL)]、发酵时间(24、36、48、60、72 h)、接种量(1%、2%、3%、4%、5%)、发酵温度(33、35、37、39、41 °C)对发酵藕渣可溶性膳食纤维含量的影响。

1.3.3.2 响应面优化试验

使用 Design Expert 软件,根据单因素试验结果,选取料液比、发酵时间、接种量为自变量,以 SDF 含量为响应值,运用 Box-Behnken 试验设计方法,设计三因素三水平试验,各因素水平见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验设计因素水平

Table 1 Factors and levels of Box-Behnken experiment design

水平	因素		
	A 料液比/(g/mL)	B 发酵时间/h	C 接种量/%
-1	1:30	24	3
0	1:40	36	4
1	1:50	48	5

1.3.3.3 ANN 模型建立

通过单因素试验确定 Box-Behnken 试验设计的料液比、发酵时间、接种量 3 个因素为输入变量,以 SDF 含量为输出变量建立 ANN 模型。利用软件 Matlab 2017b 中 Neural Network Tool 构建 BP 神经网络模型,模型包括输入层、隐藏层和输出层。从 17 组试验结果的数据集中选取 70% 用于训练,15% 用于测试,15% 用于验证。

1.3.3.4 遗传算法寻优设计

ANN 预测模型构建后,通过 Matlab 遗传算法工具箱,利用人工神经网络生成的数据作为初始种群,模拟物种繁殖、杂交、变异、竞争、选择等自然现象对个体种群反复修改,进行遗传算法寻优,得到最大输出变量^[17]。对提取条件中的料液比、发酵时间、接种量 3 个因素在一定范围内进行人工神经网络模拟运算,以模型拟合值建立个体适应函数进行全局寻优。

1.3.3.5 响应面与 ANN-GA 模型验证比较

为了检验模型有效性及准确性,验证响应面与 ANN-GA 模型下最优条件 SDF 含量的实际值与试验值之间差异,通过模型决定系数(R^2)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均偏差(absolute average deviation, AAD)评估两个模型预测能力^[18],公式如下。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k X_{i,p} - X_{i,e}}{\sum_{i=1}^k X_{i,e} - \bar{X}}$$
$$A = \frac{\sum_{i=1}^k |X_{i,p} - X_{i,e}|}{k}$$
$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_{i,p} - X_{i,e})^2}{k}}$$

式中: $X_{i,e}$ 为第 i 组的试验值; $X_{i,p}$ 为第 i 组的预测值; $\bar{X}$ 为所有试验值的平均值; k 为试验组数。

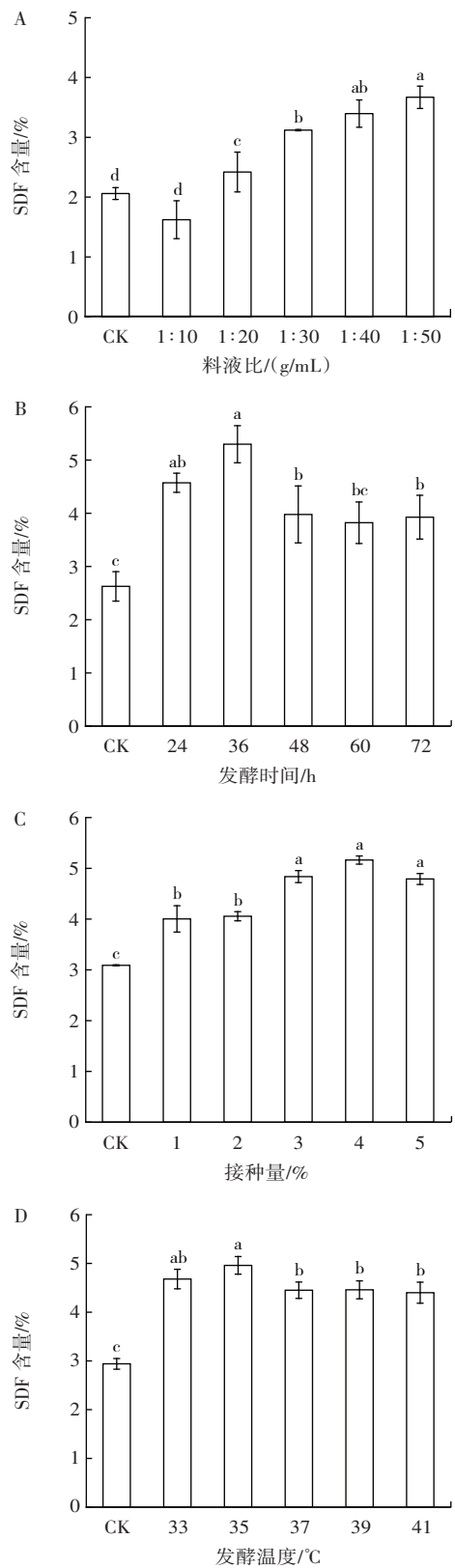
1.4 数据统计分析

采用 SPSS Statistics 进行单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA),选择邓肯法用于检验不同组样本之间差异显著性($P < 0.05$)。Origin Pro 2021 软件绘制图表;Design Expert 进行 Box-Behnken 设计并构建响应面模型;Matlab 2017b 构建 ANN 模型并使用 GA 优化。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

图 1 为料液比、发酵时间、接种量、发酵温度对 SDF 含量的影响。



A. 料液比;B. 发酵时间;C. 接种量;D. 发酵温度。CK 表示未经乳酸菌发酵的藕渣样品。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 各因素对藕渣 SDF 含量影响

Fig.1 Effects of various factors on SDF content of lotus root residues

由图 1A 可知,随着溶剂体积的增大,SDF 含量逐渐增大。当溶液体积较小时,灭菌后样品呈黏稠状态,流动性较差,导致藕渣与乳酸菌接触不充分,体系中过高的营养物质浓度造成基质渗透压增大^[19]。随着溶剂体积的增大,发酵液底物接触更加充分,反应更加彻底,使得 IDF 转化为 SDF^[20],SDF 含量升高。当溶剂体积过大时,体系中营养物质浓度较低,影响微生物对发酵基质中营养物质利用率,综合考虑提取效率与生产成本,并在 SDF 含量相对提高基础上,选取料液比 1:30、1:40、1:50 (g/mL)进行后续试验。

由图 1B 可知,随着发酵时间的延长,SDF 含量先增加后降低并趋于稳定,当发酵时间为 36 h 时,SDF 含量达到(5.30±0.09)%。在 36 h 前,菌株中酶对藕渣样液中的 IDF 进行降解,生成小分子多糖,进一步转化为 SDF^[21]。发酵时间高于 36 h 后,微生物生长供能的糖类消耗增大^[22],发酵时间过长,酸性环境下抑制菌体生长,产生菌体自溶,发酵能力下降,导致 SDF 含量逐渐减少^[23]。另外,从经济角度考虑,发酵时间过长导致耗能过高,因此,选取发酵时间 24、36、48 h 进行后续试验。

由图 1C 可知,随着接种量的增大,SDF 含量先增加后降低,当接种量达到 4% 时,SDF 含量显著提高;当接种量过少时,微生物生长迟缓期延长,发酵剂所提供的活菌数不足以完成藕渣的发酵,影响乳酸菌代谢产物生成^[24]。随着接种量增加,发酵液中可产生更多的酶,促进发酵彻底,接种量过大时,菌体生长旺盛,消化分解迅速,发酵液营养物质快速消耗^[25],使得微生物吸收利用 SDF,并引起后续发酵动力不足。因此,选取接种量 3%、4%、5% 进行后续试验。

由图 1D 可知,随着发酵温度升高,SDF 含量呈现先升高后下降趋势,在 33~39 °C 范围内,35 °C 下 SDF 含量最高,为(4.96±0.18)%。可能由于在一定温度范围内,伴随发酵温度持续升高,乳酸菌生长代谢降低,发酵能力下降^[1]。发酵温度过高超过菌体最适生长温度,藕渣中 SDF 分子自身结构遭到破坏,造成 SDF 损失。综合考虑,选定发酵温度 35 °C 进行后续试验。

2.2 响应面优化试验结果

响应面试验设计和结果见表 2。

表 2 响应面试验设计和结果

Table 2 Design and results of response surface experiment

组号	A 料液比/(g/mL)	B 发酵时间/h	C 接种量/%	SDF 含量/%
1	1:40	48	3	4.96
2	1:40	36	4	4.00
3	1:30	48	4	4.49
4	1:40	48	5	3.69
5	1:40	24	3	3.73

续表 2 响应面试验设计和结果

Continue table 2 Design and results of response surface experiment

组号	A 料液比/(g/mL)	B 发酵时间/h	C 接种量/%	SDF 含量/%
6	1:50	36	5	3.56
7	1:40	24	5	4.23
8	1:30	36	3	3.57
9	1:40	36	4	4.37
10	1:40	36	4	4.65
11	1:30	36	5	2.61
12	1:40	36	4	4.63
13	1:50	36	3	3.39
14	1:30	24	4	3.27
15	1:40	36	4	4.57
16	1:50	24	4	4.43
17	1:50	48	4	4.47

利用 Design Expert 软件处理分析表 2 的试验结果,二次多项式回归拟合,得到以 SDF 含量(Y)对自变量 A(料液比)、B(发酵时间)、C(接种量)的回归方程: $Y=4.44-0.24\times A+0.24\times B-0.20\times C+0.30\times AB-0.28\times AC-0.44\times BC-0.57\times A^2+0.30\times B^2-0.59\times C^2$ 。

响应面回归模型的方差分析结果见表 3。

表 3 响应面回归模型拟合结果

Table 3 Fitting results of response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	5.91	9	0.66	13.01	0.001 4	**
A 料液比	0.46	1	0.46	9.04	0.019 8	*
B 发酵时间	0.48	1	0.48	9.42	0.018 1	*
C 接种量	0.30	1	0.30	6.03	0.043 8	*
AB	0.35	1	0.35	6.90	0.034 1	*
AC	0.32	1	0.32	6.32	0.040 1	*
BC	0.78	1	0.78	15.52	0.005 6	**
A ²	1.39	1	1.39	27.53	0.001 2	**
B ²	0.37	1	0.37	7.28	0.030 7	*
C ²	1.40	1	1.45	28.75	0.001 1	**
残差	0.35	7	0.050			
失拟项	0.058	3	0.019	0.26	0.850 9	
纯误差	0.30	4	0.074			
总离差	6.26	16				

注:**表示差异极显著($P<0.01$);*表示差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,回归模型 $P<0.01$,表明此回归模型影响效果极显著;失拟项 $P>0.05$,表明该回归模型不具有失拟性^[26],模型拟合效果较好。其中,总决定系数 $R^2=0.943\ 6$,反映出 94.36% 响应变化。校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.871\ 1$,表明本回归模型 87.11% 响应值变化决定于所选的变量因素。变异系数=5.57% $<10\%$,此试验具有重复性。由于 $F_B>F_A>F_C$,因此不同因素对响应值 SDF 含量影响大小顺序为 B(发酵时间) $>$ A(料液比) $>$

C(接种量);一次项 A、B、C 影响显著 $P<0.05$;二次项 A^2 、 C^2 影响极显著 $P<0.01$, B^2 影响显著 $P<0.05$;交互项 AB、AC 影响显著 $P<0.05$,BC 影响极显著 $P<0.01$ 。

2.3 响应面最优条件验证试验

利用 Design Expert 软件分析对回归方程进行求解,得到发酵制取藕渣 SDF 最佳工艺参数为料液比 1:41.797 7(g/mL)、发酵时间 47.545 9 h、接种量 3.416%,在此条件下,藕渣 SDF 含量为 5.058 07%。为便于实际操作,将最佳工艺参数调整为料液比 1:42 (g/mL)、发酵时间 47.5 h、接种量 3.4%,在此条件下进行 3 次平行验证试验,得到 SDF 含量平均值为(5.02 $\pm$ 0.14)%。

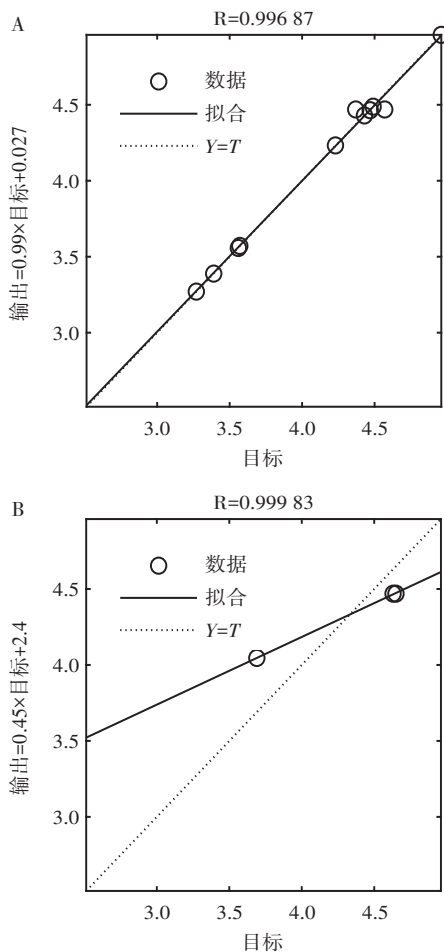
2.4 人工神经网络模型建立与遗传算法优化

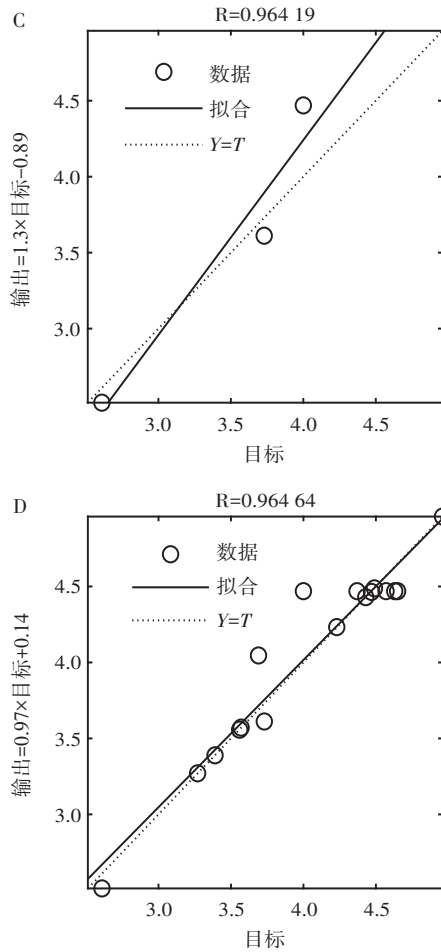
2.4.1 人工神经网络模型构建与结果分析

利用软件 Matlab 2017b 中 Neural Network Tool 构建 3 层 BP 神经网络分析模型,将料液比、发酵时间、接种量作为模型的 3 个输入神经元,中间 1 个隐藏层,隐藏层中神经元个数为 10,SDF 含量作为模型唯一输出变量,从而构建一个 3-10-1 的网络拓扑结构。

2.4.2 人工神经网络模型构建结果

人工神经网络中拟合度通过将试验预测值、训练值、验证值进行比较得到,其中人工神经网络模型数据集目标值的散点图见图 2。





A. 训练; B. 验证; C. 测试; D. 整体。

图2 神经网络模型数据集目标值的散点图

Fig.2 Scatter plot of target values of ANN model dataset

由图2可知,ANN开发的训练、测试、验证模型回归系数分别为0.996 87、0.999 83、0.964 19,整体模型回归系数为0.964 64。由ANN训练结果得到R值近似接近于1,此高回归值显示预测值与数据集的实际值相似度高,表明构建的神经网络模型对于试验结果的预测能力可靠。

ANN模型中均方误差(mean-square error, MSE)值越小,ANN模型预测试验数据准确性越高^[18, 27]。其中,神经网络模型迭代图见图3。

由图3可知,在训练、验证和测试过程中,MSE值随迭代次数增加逐渐接近最优值,网络学习效果较好,在第3个epoch时验证效果最好,MSE值为0.061 746,近乎接近于0。

2.4.3 遗传算法优化结果

利用Matlab 2017b遗传算法计算工具进行全局寻优,GA-ANN作为遗传算法适应度函数,变量维数为3,经过遗传算法优化,在98次遗传迭代获得最优解,结果为料液比1:37.944 (g/mL)、发酵时间48 h、接种

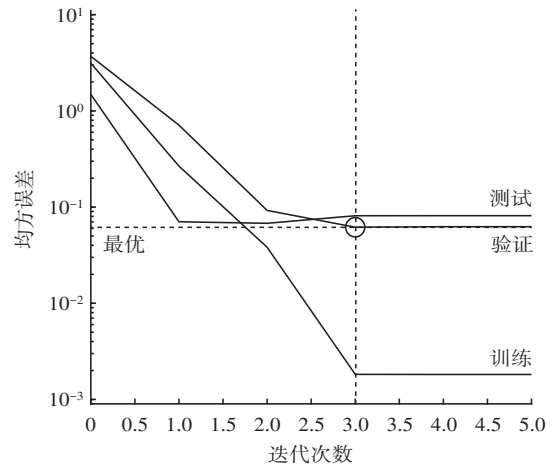


图3 神经网络模型迭代图

Fig.3 Iteration graph of ANN model

量4.017%,在此条件下,藕渣SDF含量为6.009 23%。为便于实际操作,将最佳工艺参数调整为料液比1:38 (g/mL)、发酵时间48 h、接种量4.0%,在此条件下进行3次平行验证试验,结果显示SDF含量为 $(5.97 \pm 0.73)\%$ 。

2.5 响应面与ANN-GA模型比较

2.5.1 响应面与ANN-GA模型评价参数比较

响应面法可在非线性建模中得到广泛应用,由于其可在试验数据统计分析中获得各输入变量对响应值的贡献,而神经网络建模可建立多阶非线性模型来拟合任意数据,因此可在数据分析中被广泛应用。基于决定系数 R^2 、RMSE、AAD比较了响应面模型和神经网络与遗传算法,结果见表4。

表4 响应面与ANN-GA模型评价参数比较

Table 4 Comparison of evaluation parameters of RSM and ANN-GA model

参数	RSM模型	ANN-GA模型
决定系数 R^2	0.943 6	0.930 5
均方根误差(RMSE)	0.206 3	0.162 7
平均偏差(AAD)	0.134 7	0.104 1

由表4可知,响应面模型的 R^2 、RMSE、AAD分别为0.943 6、0.206 3、0.134 7,ANN-GA模型的 R^2 、RMSE、AAD分别为0.930 5、0.162 7、0.104 1,响应面与ANN-GA模型的 R^2 都达到0.93以上,表明模型整体拟合效果较好,ANN-GA模型的RMSE、AAD相比于响应面模型更小,因此模型拟合的预测值离散程度更低,预测结果更准确^[18]。综上比较,ANN-GA模型对比响应面模型预测副干酪乳杆菌发酵藕渣膳食纤维效果更佳。

2.5.2 响应面与ANN-GA模型优化结果比较

鉴于建立的ANN-GA模型比RSM模型具有更高

拟合度、精度和预测能力等特点,进一步检测模型可靠性,验证响应面与 ANN-GA 模型优化的最佳组合及预测值,并对其两者进行比较,结果如表 5 所示。

表 5 响应面与 ANN-GA 模型优化结果比较

Table 5 Comparison of RSM and ANN-GA model optimization results

模型	最优条件			SDF 含量/%		相对误差/%
	料液比/ (g/mL)	发酵时 间/h	接种 量/%	预测 值	试验 值	
RSM	1:42	47.5	3.4	5.06	5.02	0.79
ANN-GA	1:38	48	4.0	6.00	5.97	0.50

由表 5 可知,响应面模型与 ANN-GA 模型的相对误差值均小于 5%,但 ANN-GA 模型相对误差值相对更低,表明 ANN-GA 模型具有更高精确度与应用性。

3 结论

乳酸菌发酵可以有效提高果蔬残渣中可溶性膳食纤维含量,增加果蔬残渣作为食品原料的可操作性,本研究接种副干酪乳杆菌发酵藕渣制备可溶性膳食纤维含量,在前期试验基础上,确定影响可溶性膳食纤维含量的主要影响因素为料液比、发酵时间、接种量。

本研究基于 RSM 和 ANN-GA 方法分别构建发酵预测模型并对两者进行比较。通过 Neural Network Tool 构建 3 层 BP 神经网络及 3-10-1 的网络拓扑结构,在此基础上通过遗传算法迭代优化,得到最优发酵条件为料液比 1:37.944 (g/mL)、发酵时间 48 h、接种量 4.017%,此时 SDF 含量为 6.009 23%,为便于实际操作,将最佳工艺参数调整为料液比 1:38 (g/mL)、发酵时间 48 h、接种量 4.0%。同时,此模型与所构建的响应面模型相比, R^2 值都达到 0.93 以上,但 RMSE、AAD 值更低,即 ANN-GA 模型整体拟合效果更优,模型具有更高精确度与应用性。

参考文献:

- [1] 段瑞冰,李洁,刘纪红,等.两种不同质地的莲藕碱性果胶组分热降解规律及流变学差异[J].食品科学,2022,43(24):7-15.
DUAN Ruibing, LI Jie, LIU Jihong, et al. Differences in thermal degradation and rheological properties of alkali-soluble pectin fraction in two kinds of *Lotus rhizome* with different textures[J]. Food Science, 2022, 43(24): 7-15.
- [2] HUANG K Q, HUANG J, ZHAO J M, et al. Natural lotus root-based scaffolds for bone regeneration[J]. Chinese Chemical Letters, 2022, 33(4): 1941-1945.
- [3] 梁天,李静,王奕斐,等.莲不同部位多糖提取纯化、结构特征与生物活性研究进展[J].食品科学,2023,44(11):317-328.
LIANG Tian, LI Jing, WANG Yifei, et al. Extraction, purification, structural features and biological activities of polysaccharides from different parts of lotus(*Nelumbo nucifera* gaertn.): A review[J]. Food Science, 2023, 44(11): 317-328.
- [4] GU Y Y, NIU L Y, SONG J F, et al. Effect of pretreatment and high hydrostatic pressure on soluble dietary fiber in lotus root residues[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 5565538.
- [5] 顾艳阳.超高压处理对莲藕膳食纤维理化性质、降糖功效的影响及应用研究[D].扬州:扬州大学,2021.
GU Yanyang. Effect of ultra-high pressure treatment on physical and chemical properties and hypoglycemic effect of lotus root dietary fiber and its application[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [6] GOUSETI O, LOVEGROVE A, KOSIK O, et al. Exploring the role of cereal dietary fiber in digestion[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(30): 8419-8424.
- [7] TANG H Y, FANG Z X, NG K. Dietary fiber-based colon-targeted delivery systems for polyphenols[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 100: 333-348.
- [8] LI S Y, LI J S, ZHU Z Z, et al. Soluble dietary fiber and polyphenol complex in lotus root: Preparation, interaction and identification[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126219.
- [9] 张启月.樱桃酒渣水溶性膳食纤维的提取、性质及其功能[D].泰安:山东农业大学,2021.
ZHANG Qiyue. Extraction, properties and functions of water-soluble dietary fiber from cherry wine residue[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.
- [10] 牛广财,符殿滨,汤华成,等.乳酸菌发酵制备沙果渣可溶性膳食纤维的工艺研究[J].黑龙江八一农垦大学学报,2010,22(3):73-76.
NIU Guangcai, FU Dianbin, TANG Huacheng, et al. Study on soluble dietary fiber (SDF) extracting technology from *Malusasiatica* pomace by lactobacillus fermentation[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22(3): 73-76.
- [11] 刘欣,姜鹏飞,傅宝尚,等.高压均质改性竹笋膳食纤维对虾糜凝胶特性及化学作用力的影响[J].食品科学,2024,45(11):192-200.
LIU Xin, JIANG Pengfei, FU Baoshang, et al. Effect of high-pressure homogenization of dietary fiber modified from bamboo shoots on surimi gel properties and chemical forces[J]. Food Science, 2024, 45(11): 192-200.
- [12] 田胜兰.铁皮石斛渣可溶性膳食纤维的改性分析及在果冻中的应用[D].南昌:南昌大学,2023.
TIAN Shenglan. Modification analysis of soluble dietary fiber from *Dendrobium candidum* residue and its application in jelly[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [13] 尹鹏,杨芸芸,赵一凡,等.基于BP人工神经网络的酿酒酵母发酵培养基优化及其水解物对真菌毒素吸附研究[J].中国粮油学报,2023,38(8):206-212.
YIN Peng, YANG Yunyun, ZHAO Yifan, et al. Optimization of *Saccharomyces cerevisiae* culture medium based on BP artificial neural network and mycotoxin adsorption studies by its hydrolysate[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 206-212.
- [14] LAU H L, WONG F W F, RAJA Noor Zaliha Raja Abd Rahman, et al. Optimization of fermentation medium components by response surface methodology (RSM) and artificial neural network hybrid with genetic algorithm (ANN-GA) for lipase production by *Burkholderia cenocepacia* ST8 using used automotive engine oil as substrate[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 50: 102696.
- [15] SALES DE MENEZES L H, CARNEIRO L L, MARIA DE CARVALHO TAVARES I, et al. Artificial neural network hybridized with a genetic algorithm for optimization of lipase production from *Peni-*

- cillium roqueforti* ATCC 10110 in solid-state fermentation[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2021, 31: 101885.
- [16] CHEN H Y, WANG B, LI J P, et al. Comparative study on the extraction efficiency, characterization, and bioactivities of *Bletilla striata* polysaccharides using response surface methodology (RSM) and genetic algorithm-artificial neural network (GA-ANN)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 226: 982-995.
- [17] AZADI S, KARIMI-JASHNI A, JAVADPOUR S. Modeling and optimization of photocatalytic treatment of landfill leachate using tungsten-doped TiO₂ nano-photocatalysts: Application of artificial neural network and genetic algorithm[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 117: 267-277.
- [18] 林耿纯. 基于 ANN 和 RSM 的水稻叶片表面接触角建模和优化[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
LIN Gengchun. Modeling and optimization of rice leaf surface contact angle based on ANN and RSM[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [19] 马梦梅. 孜然膳食纤维改性及降血糖活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
MA Mengmei. Study on modification of cumin dietary fiber and its hypoglycemic activity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [20] 刘豪, 王岸娜, 吴立根. 发酵改性对麸皮中可溶性膳食纤维含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 21-27.
LIU Hao, WANG Anna, WU Ligen. Effect of fermentation modification on dietary fiber content in bran[J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 21-27.
- [21] 闵钟慢, 高路, 高育哲, 等. 黑曲霉发酵法制备米糠粕可溶性膳食纤维工艺优化及其理化分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 112-118.
MIN Zhongman, GAO Lu, GAO Yuzhe, et al. Optimization of the preparation process for soluble dietary fiber from rice bran by *Aspergillus niger* fermentation and its physicochemical properties[J]. Food Science, 2018, 39(2): 112-118.
- [22] 许锡凯. 好食脉孢菌固态发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其功能性质[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2021.
- XU Xikai. Preparation of soluble dietary fiber from wheat bran by solid-state fermentation of *Neurospora acidophilus* and its functional properties[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2021.
- [23] 杜斌, 冯军, 李苗苗, 等. 发酵法制取蓝莓果渣可溶性膳食纤维工艺优化及其特性分析[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 118-123.
- DU Bin, FENG Jun, LI Miaomiao, et al. Optimization of fermentation of blueberry pomace for soluble dietary fiber preparation and quality indexes analysis[J]. Food Research and Development, 2020, 41(9): 118-123.
- [24] 左茜, 张士康, 朱科学, 等. 乳酸菌发酵法制备茶渣可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 138-141.
ZUO Qian, ZHANG Shikang, ZHU Kexue, et al. Study on preparation technology of soluble dietary fiber extracted from tea residue by *Lactobacillus* fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 138-141.
- [25] 丁小娟, 孟满, 赵泽伟, 等. 发酵法制取刺梨果渣膳食纤维工艺优化及其特性分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(7): 97-103.
DING Xiaojuan, MENG Man, ZHAO Zewei, et al. Optimization of fermentation of roxburgh rose pomace for dietary fiber preparation and quality indexes analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(7): 97-103.
- [26] 王晨, 王燕, 吴卫国, 等. 挤压膨化方便粥的工艺优化及品质特性分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 170-181.
WANG Chen, WANG Yan, WU Weiguo, et al. Process optimization of extruded instant porridge and analysis of its quality characteristics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 170-181.
- [27] 游云, 黄晓霞, 肖斯立, 等. 反向传播-人工神经网络在辐照黑椒牛肉品质预测中的应用[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 228-237.
YOU Yun, HUANG Xiaoxia, XIAO Sili, et al. Application of back-propagation-artificial neural network in predicting the quality of irradiated black pepper beef[J]. Food Science, 2024, 45(8): 228-237.

责任编辑: 王艳

收稿日期: 2024-03-05